

## معرفی روش‌های جدید مکانیکی برای ارزیابی کمی قدرت چسبندگی بین پوشش و زمینه\*

حسن احمدی مقدم<sup>(۱)</sup>

**چکیده** در این تحقیق، روش‌های متفاوت اندازه‌گیری کیفیت (قدرت) چسبندگی بر روی انواع نمونه‌های پوشش داده شده آزمایش شده و مشکلات و محدودیت‌های آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای برطرف نمودن کاستی‌های هر روش پیشنهادات و طراحی‌های تکمیلی و نیز، روش‌هایی نوین ارائه می‌گردند. در آزمایش برش‌های متقاطع و نوار چسب، کوشش می‌شود به وسیله ایجاد بعضی تغییرات در روش آزمایش، دامنه و یا جدول معیارهای تعیین‌کننده کیفیت را گسترش داده و در صورت امکان آزمایش یاد شده را به یک روش اندازه‌گیری کمی تبدیل نمود. گیره طراحی شده جدیدی برای آزمایش جدایش کششی که می‌تواند بجای چسب برای گرفتن زمینه عمل نماید، طراحی و ساخته شده و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. روش آزمایش نوینی برای اندازه‌گیری کمی قدرت چسبندگی، (الهام گرفته از آزمایش خراش و بر اساس ایجاد سایش بالا و قفل مکانیکی) تحت نام جدایش سایشی به اجرا گذاشته می‌شود. نتایج بدست آمده از ارتباط زاویه‌های برش و سطوح جدا شده در آزمایش برش‌های متقاطع و نوار چسب، بسیار امیدوارکننده می‌باشند. گیره طراحی شده برای آزمایش جدایش کششی، مواردی چون آسانی عمل، سرعت و دقت را به ارمغان می‌آورد. با بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش نوین جدایش سایشی و مقایسه آن‌ها با سایر نتایج، می‌توان این آزمایش را به عنوان یک آزمایش کمی مناسب برای اندازه‌گیری قدرت چسبندگی و نیز، مفید برای انواع پوشش‌ها با زمینه‌های مختلف معرفی نمود.

**واژه‌های کلیدی** چسبندگی، جدایش، کشش، برش، اصطکاک، قفل مکانیکی، لایه پوششی.

### Introducing Novel Mechanical Methods for Quantitative

### Evaluation of Adhesion in Thin Coatings

H. Ahmadi Moghadam

**Abstract** In this research, attempt is made to introduce new and developed techniques of quantitative methods of adhesion measurements for coated substrates. In the qualitative Cross Cut/Scotch Tape Test, the square lattice cuts have been developed to diamond lattices with different angles. The aim is to find out, if there exists any relationship between the adhesion strength, separated areas of coating and angle of diamond lattices. The Pull-Off Test method is developed by a new design for its employed grips to hold inert substrates mechanically rather than using adhesives. A new quantitative method of measuring adhesion strength is designed and introduced. It is based on creating mechanical interlocking between a rough surface and the coating by vertical loads. This could cause shear separation between the coating and the substrate. Results of different measurements, on many samples, in the above tests are correlative and prosperous.

**Keywords** Adhesion, Separation, Tensile, Shear, Friction, Mechanical Interlocking, Coating.

\* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۲/۵/۲۶ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۲/۸/۱۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار، پژوهشکده صنایع رنگ ایران، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

## مقدمه

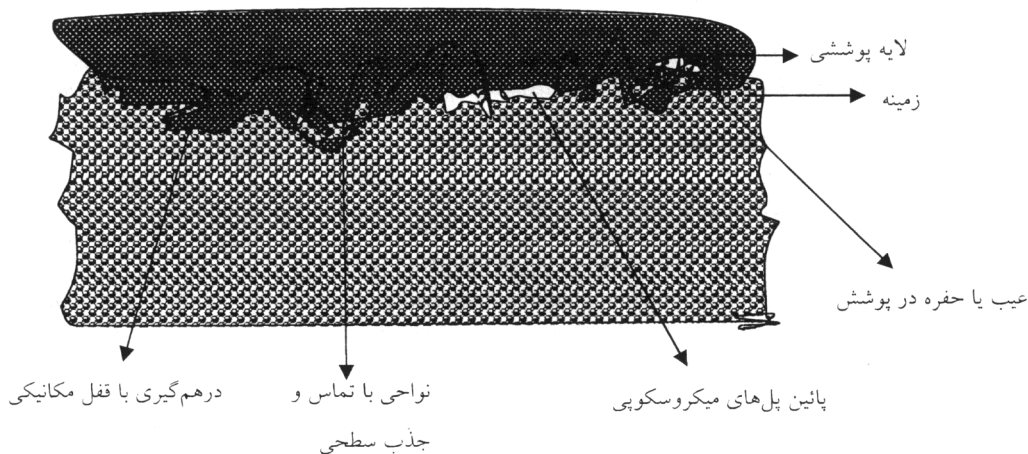
قطعات و ابزار کاربردی با هدف‌هایی چون بالا بردن خواص سطحی، محافظت در برابر عوامل مختلف، ایجاد رنگ‌های مطلوب، و یا به صورت چاپ، پوشش داده می‌شوند. به طور معمول، لایه‌های پوششی توسط مکانیسم‌های مختلف ایجاد چسبندگی، که اساساً به چهار دسته تقسیم می‌شوند، بر روی انواع سطوح قرار می‌گیرند. این مکانیسم‌ها شامل: ۱- جذب سطحی، ۲- نفوذ، ۳- درهم‌گیری یا قفل مکانیکی، شکل (۱) و ۴- الکترواستاتیک می‌باشند [1].

خواص و کیفیت چسبندگی لایه‌های پوششی به جنس و نوع پوشش و زمینه و شرایط و خواص فیزیکی آن‌ها بستگی دارد. ارزیابی کیفیت و قدرت چسبندگی پوشش و زمینه، به وسیله ابزار مکانیکی مناسب انجام می‌پذیرد. تخریب‌های مکانیکی در سطوح قطعات پوشش‌دار در حین کاربرد شامل سایش، خراش و جدایش هستند که ممکن است: الف - در فصل مشترک ماده پوشش‌دهنده با زمینه، ب - در توده ماده پوشش‌دهنده، ج - در داخل زمینه، و یا د - در چند مکان مختلف، همزمان رخ دهند.

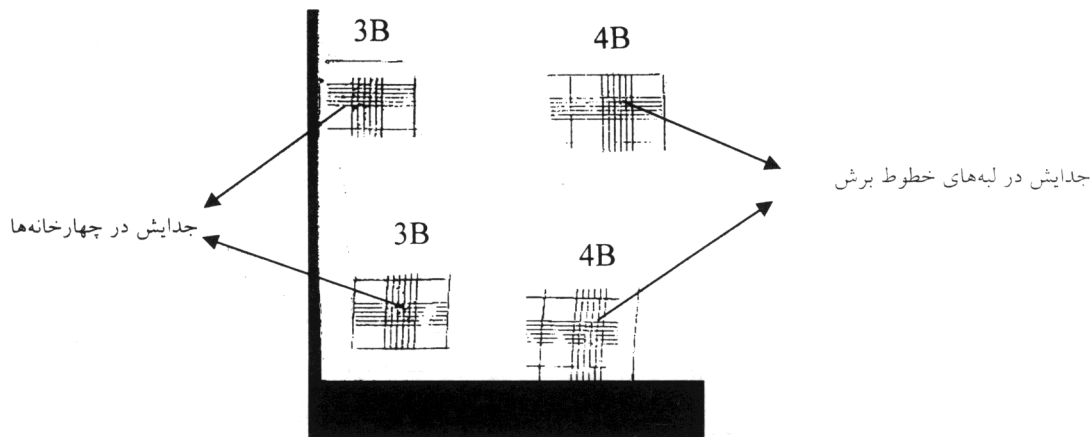
برای بررسی و اندازه‌گیری قدرت چسبندگی از روش‌های آزمایشی کیفی و کمی متفاوت متناسب با ماهیت روش پوشش‌دهی استفاده می‌شود [2,3]. عواملی مانند جنس، نرمی یا سختی، ضخامت لایه پوشش دهنده و زمینه، شرایط و غیره می‌توانند در انتخاب روش آزمایشی نقش داشته باشند.

در این تحقیق، نخست روش‌های آزمایشی مختلف برای اندازه‌گیری کیفیت و قدرت چسبندگی پوشش‌ها معرفی می‌شوند و به پاره‌ای موارد مهم در خصوص آن‌ها اشاره می‌گردد. سپس به بررسی روش‌های تکمیل‌شده یا نوین، با هدف ارزیابی قدرت چسبندگی به‌طور کمی و یا مقایسه‌ای پرداخته می‌شود.

**روش برش‌های متقاطع و نوار چسب [4].** این آزمایش برای تعیین کیفیت چسبندگی در صنعتی بسیار متداول است. آزمایشی ساده و سریع می‌باشد. کیفیت چسبندگی بر پایه نوع و میزان سطح جدایش پوشش از زمینه پس از آزمایش، طبق جدول ارائه‌شده در استاندارد مربوطه ارزیابی می‌شود؛ شکل (۲). زیاد شدن

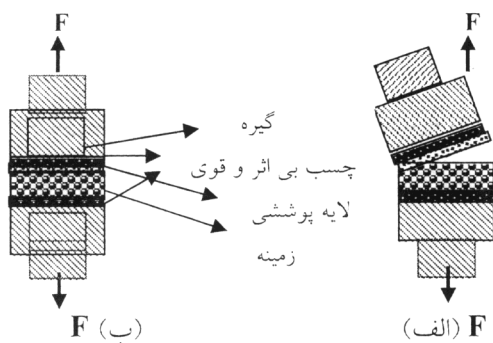


شکل ۱ تصویری از فصل مشترک بخشی از یک قطعه پوشش داده شده



شکل ۲ قسمتی از یک نمونه آزمون شده مربوط به آزمایش برش‌های متقاطع و نوار چسب (زمینه پلی‌اتیلن با پوششی یکنواخت از رزین پایه‌اپوکسی)

۱- انتخاب یک چسب مناسب و به حد کافی قوی و بی‌اثر (چه از لحاظ شیمیایی، چه از لحاظ حرارتی) برای استفاده در چسباندن سطح لایه پوششی و سطح طرف دیگر، یعنی پشت زمینه، به عوامل‌کننده (گیره‌ها) در دستگاه کشش؛ شکل (۳)، ۲- اطمینان‌یافتن از



شکل ۳ آزمایش جدایش کششی

(الف)، نیروهای کششی در یک راستا؛ (ب)، نیروهای غیر منطبق

و منطبق بر محور اصلی گیره‌ها

قرار گرفتن نیروهای کششی در یک راستا و منطبق بر محور اصلی کشش و جلوگیری از امکان جدا شدن لایه پوششی از زمینه به حالت لبه‌ای برای انجام این کار نیاز

فاصله بین تیغه‌های برش، و به عبارت دیگر افزایش سطح چارخانه‌ها با ضخامت پوشش در ارتباط می‌باشد.

به منظور امکان تبدیل نتایج آزمایش فوق از حالت کیفی به حالت کمی، محقق پیشنهاد می‌نماید، بجای بریدن لایه پوششی در دو جهت عمود برهم، و بدست آوردن چارخانه‌های مربع‌شکل، بریدن لایه در زوایای مختلف انجام شود تا چارخانه‌های مربع‌شکل به صورت لوزی‌های منظم درآیند. از این قرار شاید بتوان ارتباطی بین کوچکترین زاویه لوزی سطح جدایش و قدرت چسبندگی پیدا نمود و شرایط تبدیل ماهیت آزمایش یاد شده را از حالت کیفی به حالت کمی فراهم ساخت.

دیگر روش آزمایش مرتبط در این بررسی، روش "Roll Test" می‌باشد که در آن بجای نوار چسب از غلتک‌هایی با شعاع‌های متفاوت استفاده می‌شود [5].

**جدایش کششی.** در این روش قدرت چسبندگی بین دو لایه، مستقیماً به وسیله دستگاه کشش در مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود؛ شکل (۳). در عین حال مشکلات انجام این روش که در زیر آورده شده است، مانع از اجرای صحیح و دقیق آن می‌شوند:

**خراش** . یکی از آزمایش‌هایی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته آزمایش خراش می‌باشد. در این آزمایش با استفاده از میله‌هایی با نوک نیم‌کره بر سطح لایه پوششی تحت نیروی عمودی فشار وارد می‌شود، درحالی‌که زمینه و پوشش در حرکت می‌باشند. نیروی عمودی فشاردهنده‌ای که در اثر آن خراش و سپس لایه برداری پوشش اتفاق می‌افتد، ثبت می‌شود. آزمایش دیگری به نام تراش [9] مشابه آزمایش خراش وجود دارد، که برای اندازه‌گیری قدرت چسبندگی بکار می‌رود.

Jindol و همکارانش [10]، رابطه زیر را برای ضریب جدایش  $K_n$  در فصل مشترک پوشش و زمینه در یک آزمایش جدید براساس ضریب و جدایش ارائه نمودند.

$$K_n = \left( \frac{G_n \cdot E_c}{1 - \nu_c} \right)^{1/2}$$

که در آن  $G_n$  و  $E_c$  مدول‌های کششی و برشی و  $\nu_c$  ضریب پواسون پوشش می‌باشند.

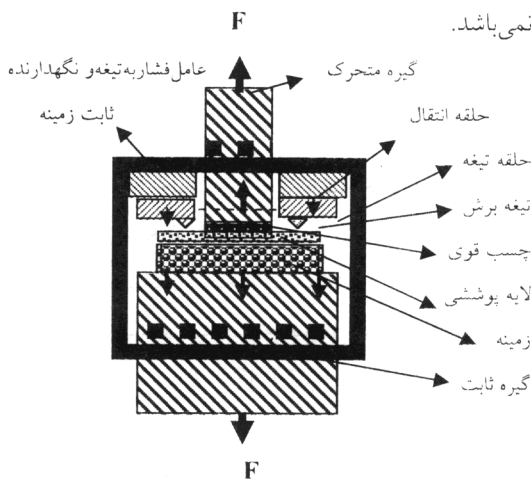
### آزمایش جدید ارزیابی قدرت چسبندگی

با الهام از روش آزمایش خراش بجای استفاده از میله‌های فشاردهنده، از یک قطعه مکعب مستطیل که یک طرف آن نیم استوانه شکل با قطرهای متفاوت ۱-۱۰ mm می‌باشد، استفاده می‌شود.

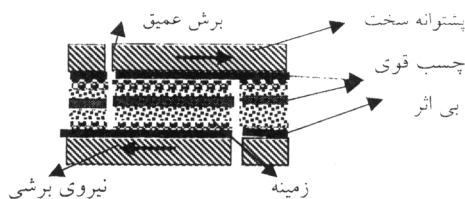
از آنجا که تغییرات انجام شده امکان لایه برداری یا جداکردن پوشش را مشکل می‌سازد، بین قطعه فشاردهنده و پوشش، از ورقه‌های لاستیک چقرمه به منظور ایجاد ضریب اصطکاک بالا و یا، سنباده با گریدهای متفاوت برای ایجاد قفل مکانیکی و سایش بالا استفاده می‌شود، و از این به بعد تحت عنوان روش آزمایش جدایش سایشی مورد مراجعه قرار می‌گیرد، شکل (۶).

به ابزار مناسب، مانند پروفیل نبشی، و استفاده از آن برای هر آزمایش می‌باشد.

در این تحقیق بنا به پیشنهاد دو مشکل یاد شده، توسط یک طرح تکمیلی محقق مرتفع می‌شود. در واقع زمینه‌ای چون پلی‌اتیلن که خواص خنثی یا غیر قطبی دارد، به حالت مکانیکی به وسیله یک فک طراحی شده، محکم گرفته و به بازوی ساکن دستگاه متصل می‌شود؛ شکل (۴). همانطور که از این شکل مشهود است دیگر نیازی به ابزار برای در یک امتداد قرار دادن نیروی کشش نمی‌باشد.



شکل ۴ مجموعه فک طراحی شده برای محکم نگهداشتن زمینه **جدایش برشی**. یکی از مرسوم‌ترین روش‌های آزمون اندازه‌گیری کمی روش قدرت چسبندگی جدایش برشی می‌باشد. نمونه‌های آزمایشی مطابق شکل (۵) تهیه شده و سپس به وسیله دستگاه کشش عمودی یا افقی تحت کشش قرار می‌گیرند در نتیجه انتظار می‌رود، پوشش یکی از دو نمونه در اثر اعمال نیروی برشی از زمینه جدا شود.



شکل ۵ نمونه آماده‌شده برای آزمایش جدایش برشی

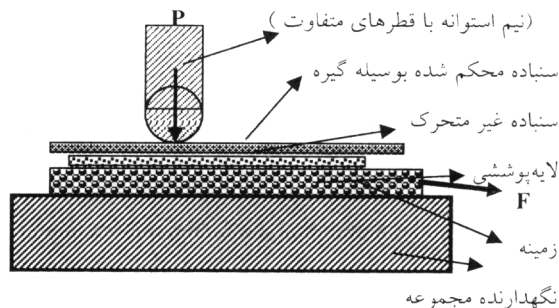
(بدون ایجاد گشتاور)

UV سخت از ضخامت‌های نازک  $12-35 \mu\text{m}$  [15] استفاده می‌شود.

با توجه به توضیحات بالا و عدم تأثیر مستقیم مواد افزودنی، به غیر از رزین پایه، بر قدرت چسبندگی، نیازی به اندازه‌گیری اجزاء و یا تعیین فرمولاسیون لایه پوششی نبود بنابراین، برای بالا بردن قدرت چسبندگی لایه پوششی در نمونه‌ها از روش افزودن درصد وزنی رزین پایه (اپوکسی + اکریلیک) [16] به فرمول اولیه لایه پوششی استفاده شد. به این ترتیب، عامل اصلی در تغییرات قدرت چسبندگی مقدار رزین پایه می‌باشد از این‌رو، منحنی‌های نتایج بدست‌آمده به وسیله دستگاه‌های اندازه‌گیری براساس تغییرات نسبت مقدار رزین پایه افزوده شده به رزین اولیه ارائه شده‌اند.

**برش‌های متقاطع پوشش و نوار چسب.** با استفاده از اهرم ساخته شده برای این آزمایش که در انتهای آن شش تیغ فولادی به طور موازی به فاصله  $1\text{mm}$  قرار داشتند، بر روی سطوح پوشش دار (نمونه‌های مسطح پلی اتیلن با وزن مخصوص بالا)، برش‌هایی یکنواخت چارخانه‌ای مربع و لوزی شکل با زوایای بین  $90^\circ-0^\circ$  درجه داده شدند. سپس بعد از تمیز کردن لایه‌های جدا شده، به خصوص درکناره‌های خطوط برش، نوار چسب اسکچاچ بر روی ناحیه بریده شده چسبانده شد و هوای بین آن با فشار انگشت خارج گردید. پس از مدتی تأمل نوار چسب با سرعت زیاد برداشته شد. در صد مساحت نواحی‌ای که لایه پوشش جدا شده بود به ویژه درکناره‌های خطوط برش با جدول موجود در استاندارد [4] مقایسه گردید و میزان کیفیت پوشش مشخص شد. نمونه‌های آزمایشی شکل‌های (۲ و ۷) شامل؛ صفحات پلی اتیلن با وزن مخصوص بالا با پوشش اپوکسی رزین،

عامل فشار دهنده ثابت و غیر متحرک



شکل ۶ فرآیند روش آزمایش ارزیابی قدرت چسبندگی،

جدایش سایشی

برای انجام این آزمایش نیاز به طراحی دستگاه مناسب و قابل تعیبه در دستگاه کشش افقی می‌باشد، که توسط محقق انجام پذیرفت.

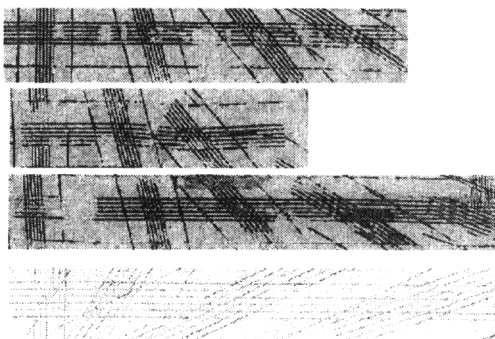
### روش تحقیق

ساخت لایه‌های پوششی و اعمال آن بر روی زیرآیندها در امکانات و دستور کار این تحقیق نبودند از این‌رو، نمونه‌های آزمایشی آماده مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌های مورد نیاز، طبق سفارش محقق در واحد ساخت تهیه شدند. آماده‌سازی سطح نمونه‌های پلی اتیلنی قبل از پوشش دهی به روش شعله دهی گاز طبیعی [11] و عمل پوشش دهی به روش چاپ اسکرین [12] انجام گرفتند.

لایه پوشش از نوعی مرکب چاپ بدون حلال با  $25\%$  وزنی دانه‌های رنگی و  $\text{TiO}_2$  بودند که توسط نور فرابنفش در مدت حدود  $2/5$  ثانیه سخت [13,14] می‌گردید.

ضخامت لایه پوششی (سخت) در روش اسکرین به‌طور کلی در محدوده  $12-125 \mu\text{m}$  می‌باشد [12]، ولی در نمونه‌های آزمایشی تهیه شده ضخامت آنها  $10 \mu\text{m}$  اندازه‌گیری شد. معمولاً در پوشش‌های (مرکب)

از آنجا که گرمای حاصل از سخت شدن چسب اپوکسی رزین ممکن بود موجب تخریب لایه پوشش دار نمونه‌ها شود، بجای آن از چسب قطره‌ای استفاده گردید. حداقل ۹ عدد از این استوانه‌ها بر روی سطح هر نمونه آزمایشی؛ سه عدد در قسمت بالا، سه عدد در قسمت وسط و سه عدد در قسمت پائین، چسبانده شدند، شکل (۸).



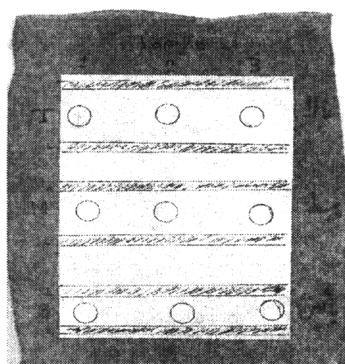
کاهش زاویه برش

شکل ۷ نمونه‌های مربوط به آزمایش برش‌های متقاطع و

نوار چسب

(برش با زاویه‌های متفاوت به منظور گسترش درجه‌بندی نتایج

کیفی یا امکان تبدیل نتایج آزمایش از کیفی به کمی)



بالا

وسط

پائین

شکل ۸ مکان‌های نمونه برداری برای آزمایش جدایش

کششی (دایره‌ها) و آزمایش جدایش سایشی

(نوارهای هاشور خورده).

بعد از خشک شدن کامل، نمونه پوشش دار یاد شده در اطراف استوانه‌ها تقریباً به قطر ۲ cm بریده شد و قطعات حاصله، تک تک برای هر آزمایش در گیره طراحی شده قرار گرفته و محکم شدند. مجموعه آماده شده فوق‌الذکر در دستگاه کشش تعیبه گردید، و آزمایش کشش تحت شرایط ۲۰۰ N کشش و سرعت نیروی کشش ۵۰۰ mm/min انجام پذیرفت.

**جدایش سایشی.** دستگاه کشش افقی تنسومتر هونسفیلد برای کشیدن و ایجاد نیروی برشی در فصل مشترک لایه پوششی و زمینه و یا در توده لایه پوششی

صفحات فولادی با پوشش اپوکسی - فنل (ورقه‌های قوطی کنسرو) و الکید رزین و غیره بودند. کاغذ گلاسه، فیلم پلی اتیلن پلی پروپیلن و پی وی سی با چاپ‌های مختلف هم مورد آزمایش قرار گرفتند.

**جدایش کششی.** از دستگاه کشش برای جدا نمودن پوشش از زمینه استفاده گردید. برای انجام این کار فک مناسبی برای بازوی ساکن دستگاه طبق پیشنهاد شده، شکل (۴) توسط محقق ساخته شد.

یکسری استوانه‌های فولادی توپر به ابعاد ۴ cm طول و ۱ cm قطر، برای چسباندن یک قاعده آنها به سطح پوشش دار نمونه آزمایشی و قاعده دیگر آنها به منظور اتصال به بازوی متحرک دستگاه، ماشینکاری شدند. برای اطمینان از چسبندگی قوی و مطمئن، سطح صاف قاعده استوانه‌های یاد شده که در تماس با نمونه‌ها بودند، قبل از چسباندن بر روی پوشش توسط عملیات سندبلاست، سنباده‌زنی و چربی‌زدائی با استن، آماده‌سازی شدند.

شده لایه پوششی از زمینه گردیدند، سپس نیروی مربوط به وزنه ها و نیروی سایشی که دستگاه نشان می‌داد، هر دو باهم ثبت شدند. به منظور آنکه نشان داده شود که لایه پوششی بدون خراش یا با تخریب زمینه، از سطح جدا می‌شود، عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) از نواحی جدایش و اطراف آن تهیه گردیدند، شکل (۹).

### نتایج و بحث

در ادامه، نتایج هر آزمایش به تفکیک مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

**برش‌های متقاطع پوشش و نوار چسب.** به‌طور کلی در یک قطعه پوشش داده شده تخریب یا جدایش در ضعیف‌ترین منطقه رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان دهنده جدایش در مناطق مختلف نمونه‌ها بودند. این مناطق در توده مواد پوششی، زمینه و چسب و یا در فصل مشترک آن‌ها مشاهده شدند:

**الف- جدایش بین نوار چسب و لایه پوششی،** در نمونه‌هایی مانند فیلم پلی اتیلن با وزن مخصوص پائین (LDPE) با چاپی یکنواخت از مرکب هواخشک، و ورق‌های فولاد گالوانیزه با پوششی از خانواده رزین‌های پایه اپوکسی مشاهده شدند، زیرا قدرت چسبندگی اپوکسی رزین به پلی اتیلن و یا فولاد، قوی‌تر از چسبندگی نوار چسب به پلی اتیلن می‌باشد. زاویه‌ها و شکل برش، اندازه‌های مختلف چارخانه‌های بریده شده و جهت برداشتن نوار چسب تأثیر چندانی بر نتایج نداشتند.

**ب- جدایش در توده لایه پوششی،** در پوشش‌هایی که به طور کامل خشک یا سخت نشده، و یا دارای درصد بالایی از دانه‌های پرکننده، رنگی و غیره

مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام این آزمایش از دو نمونه پوشش‌دار به ابعاد  $4 \times 2$  cm استفاده گردید به طوری که دو سطح پوشش‌دار با چسب قطره‌ای به هم چسبانده شدند.

**خراش - جدایش برشی.** به خاطر عدم دستیابی به دستگاه مربوطه این روش انجام نگرفت. Jardret و همکاران او [17] بررسی‌های جدیدی انجام داده‌اند که برای مطالعه در مورد روش یاد شده می‌توان به مقاله آنها مراجعه نمود.

### روش جدید ارزیابی قدرت چسبندگی -

#### جدایش سایشی

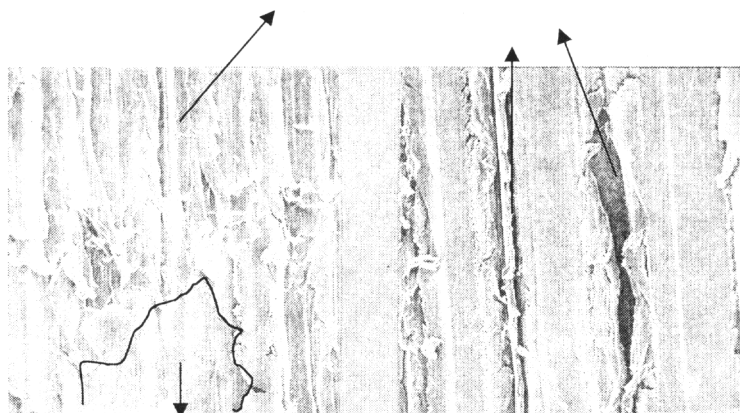
بر اساس آزمایش جدایش سایشی و نیز مناسب برای استفاده در دستگاه کشش افقی (تنسومتر هونسفیلد) دستگاه جدیدی طراحی و ساخته شد.

نمونه‌های مورد نیاز در دستگاه فوق در اشکال (نوار، مثلث و پله‌ای) و ابعاد مختلف از نمونه اصلی بریده شدند. نوارهای  $1 \times 10 \text{ cm}^2$ ، مناسب‌ترین اندازه‌ها تشخیص داده شدند شکل (۸).

یک سر نمونه به بازوی ساکن و سر دیگر در داخل قسمت دیگر دستگاه که به بازوی متحرک متصل بود، جا سازی شد، به طوری که سناده کاغذی گرید ۱۸۰ به صورت نوار پهن، بین قطعه اعمال‌کننده نیروی عمودی و سطح پوشش‌دار نمونه، قرار می‌گرفت.

مادامی که بازوی متحرک دستگاه قطعه اعمال‌کننده نیرو و سناده زیر آن‌را که در تماس با سطح لایه پوششی بود، با سرعت  $50 \text{ mm/min}$  می‌کشید، وزنه‌ها بر روی قطعه اعمال‌کننده نیرو بتدریج اضافه می‌شدند، تا جایی که خراش‌های ایجاد شده در سطح لایه پوشش‌دار نمونه تبدیل به قطعات (لخته‌ها) جدا

خراش‌های ایجادشده پس از سایش سنباده تحت فشار بر روی لایه پوششی



جدایش لایه پوششی به صورت لخته‌ای از زمینه

شکل ۹ عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی ۱۸۰ برابر پس از آزمایش جدایش سایشی

فصل مشترک و کناره‌ها، محقق در انجام این آزمایش، نتوانست تأثیر عواملی چون جهت برداشتن نوارچسب، زاویه‌های متفاوت در برش‌های لوزی‌شکل و یا تعداد چارخانه‌ها را، در درجه بندی کیفیت بررسی و نشان دهد.

د- جدایش در توده زمینه، در نمونه‌های آزمایشی چون مقوا گلاسه یا مقوا با پوشش پلی‌مری مانند: پی‌وی‌سی امولسیون (EPVC)، ملاحظه گردید. به علت ضعیف‌تر بودن زمینه نسبت به لایه پوششی و چسبندگی آن در فصل مشترک، بررسی تأثیر عواملی چون زاویه‌های متفاوت برش، جهت برداشتن چسب و غیره که قبلاً عنوان شدند، امکانپذیر نشد. مشاهدات نشان می‌دهند: با کوچک‌تر شدن زاویه‌های برش مساحت سطح لایه‌های پوششی جدا شده از زمینه و تعداد چهارخانه‌های بدون پوشش بیشتر می‌شوند. از طرف دیگر هرچه زاویه برش  $\theta$  کوچک‌تر می‌گردد، مساحت سطح چهارخانه‌ها،  $A$ ، طبق رابطه  $A = a^2 \frac{1}{\sin\theta}$  افزایش می‌یابد. در این رابطه  $a$  فاصله بین تیغه‌های برش می‌باشد، شکل (۷).

بودند مانند پلی‌اتیلن چاپ شده، مشاهده گردید. در این موارد بریدن و چارخانه نمودن لایه پوششی تأثیری بر میزان جدایش پوشش از زمینه نداشتند و پوشش بدون برش جدا و باقی مانده آن به وضوح در سطح زمینه دیده شد.

ج- جدایش در فصل مشترک لایه پوششی و سطح زمینه، در مناطقی که چسبندگی نوارچسب و لایه پوششی قوی‌تر از نیروی چسبندگی در فصل مشترک لایه پوششی و زمینه بود، رخ داد. مشاهده شد هرچه وسعت و تعداد چهارخانه‌ها بدون پوشش بیشتر باشد کیفیت نسبی چسبندگی پوشش به زمینه پایین‌تر است. برای درجه بندی کیفیت از جدول ارائه شده در استاندارد ASTM [4] استفاده گردید. جدایش توده‌ای، در نمونه‌هایی که دارای کمترین درصد رزین پایه (بیشترین درصد دانه‌های پرکننده یا رنگی) در فرمول لایه پوششی بودند، بدست آمد، شکل (۷). در درصد‌های بالاتر رزین پایه در فرمول لایه پوششی، در مناطقی که عوامل سخت‌کننده، مانند نور یا گرمای کافی باسانی به فصل مشترک و یا کناره‌های پوشش و سطح زمینه رسیده بودند، تخریب یا جدایش مشاهده نشد. از این رو، به دلیل بالا بودن قدرت چسبندگی در



زیرا استوانه‌های توپر بر روی نمونه بزرگ اصلی، نخست در جاهای مناسب چسبانده، سپس بریده و در دستگاه کشش جاسازی شدند.

مشاهدات آزمایشگاهی نشان‌دهنده جدایش کامل در فصل مشترک پوشش و زمینه و یا بخشی از آن می‌باشد، شکل (۱۰).

تغییرات نیروی کشش بر واحد سطح نمونه‌ها با افزایش مقدار رزین پایه در لایه پوششی در نمودار شکل (۱۱) ارائه شده و حاکی از آن است که با بالا رفتن درصد رزین پایه (یا کاهش پرکننده‌ها)، کیفیت چسبندگی افزایش می‌یابد، و جهشی در حدود ۶۵ درصد (نسبت رزین پایه به فرمول اولیه پوشش) از خود نشان می‌دهد.

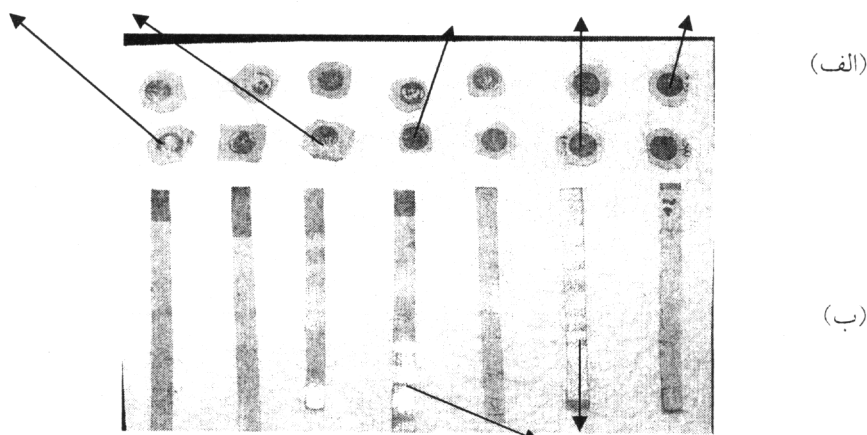
از آنجا که تمامی سطح لایه پوششی (بجز نمونه‌هایی با پوشش رزین پایه پائین)، از زمینه جدا نشدند، بنابراین نیروهای اندازه‌گیری شده نمی‌توانند مستقیماً بیانگر قدرت چسبندگی در نمونه‌ها باشند. ۱- با رجوع به آزمایش برش‌های متقاطع و

نتیجه آنکه با انجام این روش پیشنهادی می‌توان گستره درجه‌بندی کیفی استاندارد [8] را افزایش داد، و یک روش تقریباً کمی را ارائه نمود.

**جدایش کششی.** بیشتر آزمایش‌ها بر روی نمونه‌هایی با زمینه پلی‌اتیلن با وزن مخصوص بالا (HDPE) و پوشش رزین پایه اپوکسی انجام شدند. به لحاظ پائین بودن انرژی آزاد سطحی پلی‌اتیلن (۲۵-۳۱ mN/m) [18]، سطح قطعات استوانه‌ای آماده شده، به وسیله چسب به سطح بدون پوشش پلی‌اتیلن چسبیده نمی‌شدند تا بتوان عمل کشش و جدایش را توسط دستگاه انجام داد. با استفاده از فک طراحی شده و ساخته شده جدید در این تحقیق که به طور مکانیکی و از بالا زمینه را در خود محکم می‌گرفت، شکل (۴)، حدود بیش از ۱۵۰ آزمایش انجام پذیرفت. موضوع قابل توجه در اینجا، سرعت بسیار بالای آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی برای اتصال به دستگاه کشش بود.

باقیمانده لایه پوششی در جدایش ناقص

نمونه‌هایی از جدایش کامل در آزمایش جدایش کششی

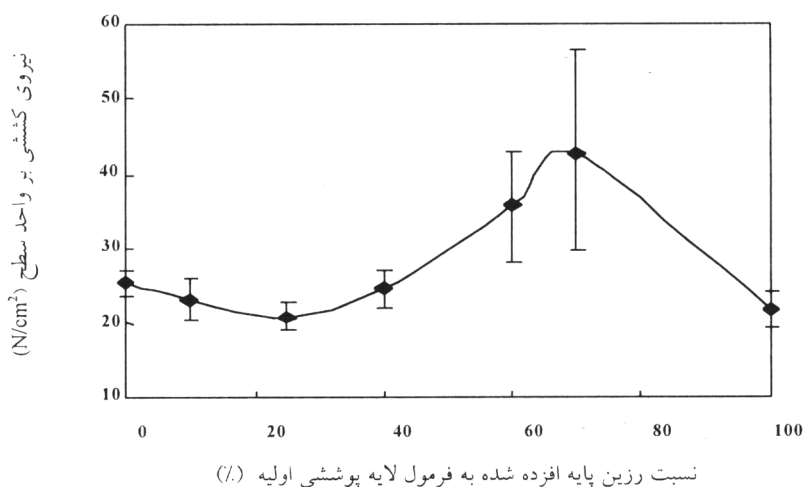


نمونه‌هایی از جدایش کامل در آزمایش جدایش سایشی

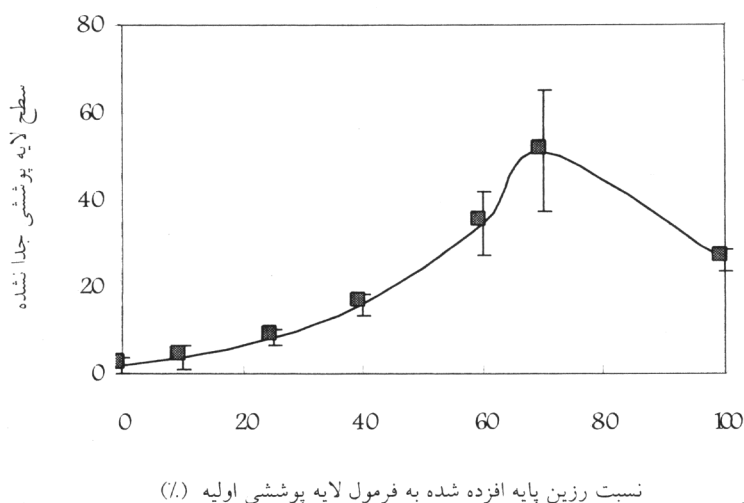
شکل ۱۰ نمونه‌های حاصله پس از انجام آزمایش‌های: (الف)، جدایش کششی؛ (ب)، جدایش سایشی

رابطه با افزایش درصد رزین پایه در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) و هماهنگی (تشابه تقریبی) آنها، شاید بتوان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که می‌توان آزمایش جدایش کششی را به‌عنوان یک آزمایش کیفی - کمی از ارزیابی قدرت چسبندگی به حساب آورد.

نوارچسب، که درصد مساحت سطح لایه پوششی جداشده را یک معیار کیفی - کمی برای قدرت چسبندگی در نظر می‌گیرد و همچنین، با مقایسه منحنی‌های تغییرات درصد مساحت سطح لایه پوششی جداشده و تغییرات نیروی کششی بر واحد سطح در



شکل ۱۱ منحنی تغییرات نیروی کششی بر واحد سطح با نسبت رزین پایه افزوده شده به فرمول لایه پوششی



شکل ۱۲ تغییرات درصد سطح لایه پوششی جدا نشده، با افزایش رزین در فرمول اولیه لایه پوششی

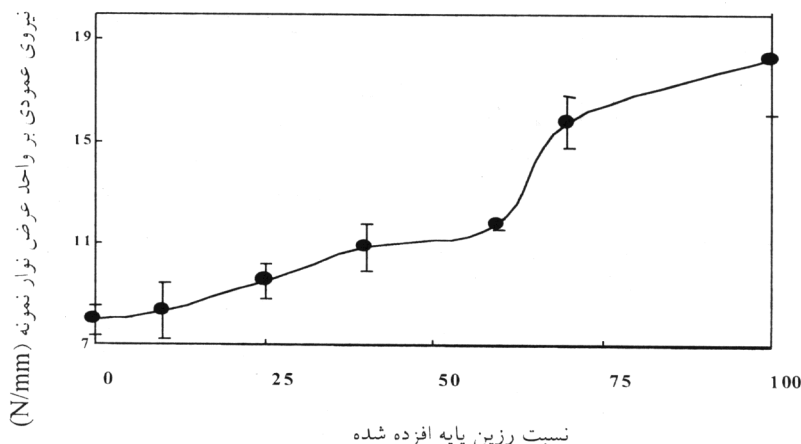
فرمول اولیه، مانند نتایج آزمایش‌های قبلی، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود. ولی این هماهنگی در محدوده ۱۰۰ درصد رزین پایه افزوده شده به فرمول اولیه وجود ندارد. به نظر محقق با بالا رفتن درصد رزین و در نتیجه افزایش ضریب انقباض در لایه پوششی در زمان سخت شدن، در بعضی از نواحی زمینه، که امکان وجود عدم تماس کامل پوشش با زمینه به طور یکنواخت می‌باشد، شکل (۱۴)، از لایه پوششی پل‌های میکروسکوپی ایجاد می‌شوند. در این حالت جدایش در آزمایش جدایش کششی کامل انجام نمی‌گیرد و بخشی از پوشش بر روی زمینه باقی می‌ماند. از این رو ممکن است اختلافات فاحشی در نتایج بدست آمده مشاهده شود. بنابراین، به کارگیری آزمایش جدایش کششی در این شرایط شاید روش دلخواهی نباشد، مگر آنکه تعداد نمونه‌های مورد آزمون را به طور چشمگیری افزایش داد و میانگین آن‌ها را اعلام نمود. در این تحقیق تعداد نمونه‌ها برای هر مورد حداقل ۲۷ و برای دو مورد ۷۰ و ۱۰۰ درصد رزین افزوده شده به فرمول اولیه، ۹ عدد بودند.

**جدایش برشی.** در محل اتصال در سطح لایه پوششی که به وسیله چسب بهم چسبیده شده بودند، جدایش رخ داد. دلایل عدم دستیابی به نتایج قابل استفاده در این آزمایش را شاید بتوان به عواملی از جمله: ۱- وجود قفل مکانیکی در فصل مشترک لایه پوششی و سطح زمینه، ۲- نازکی لایه پوششی  $10 \mu\text{m}$  و ۳- پائین بودن خواص برشی در چسب به کاررفته شده (در چسباندن سطوح لایه پوششی نمونه‌ها به هم دیگر) نسبت داد.

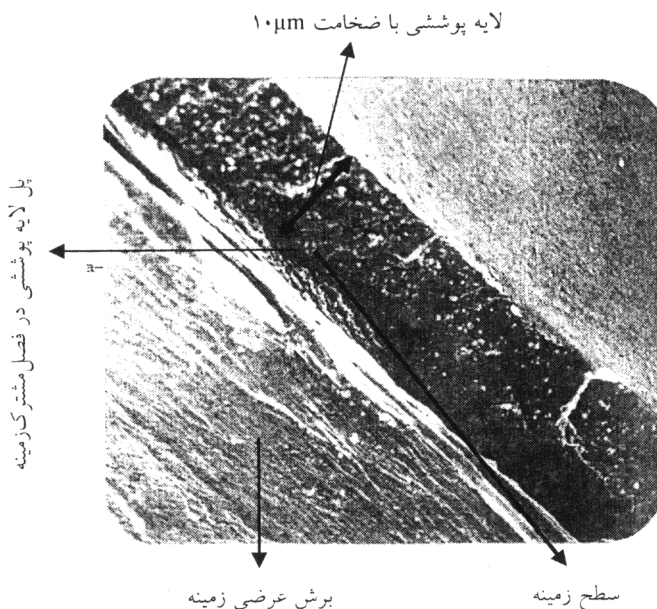
### روش جدید ارزیابی قدرت چسبندگی: جدایش سایشی

در واقع جدایش، پس از شروع حرکت ثابت زمینه در اثر سایش و ایجاد قفل مکانیکی قوی، در محل فصل مشترک لایه پوششی و سنباده، تحت نیروی عمودی فشار وزنه‌ها رخ می‌دهد، شکل (۶). از آنجا که فصل مشترک مزبور یک خط راست می‌باشد. نتایج بدست آمده تحت عنوان مقدار نیرو (وزنه‌ها) بر واحد خط تماس ثبت گردیده‌اند، شکل (۱۳).

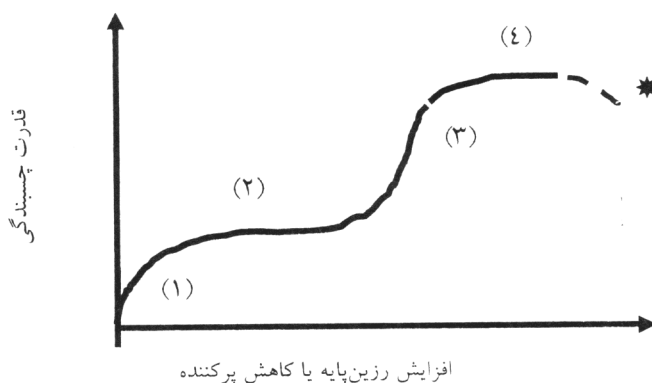
همانگونه که انتظار می‌رود، یک جهش قابل توجه در محدوده ۶۵ درصد نسبت رزین پایه افزوده شده به



شکل ۱۳ منحنی تغییرات نیروی عمودی وارد بر واحد خط تماس استوانه فشاردهنده بر نمونه آزمایشی در دستگاه سایش به منظور جدا نمودن لایه پوششی، در اثر افزایش مقدار رزین پایه (با کاهش مقدار پرکننده‌ها) در فرمول اولیه لایه پوششی.



شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی (SEM) فصل مشترک لایه پوششی و زمینه و پل میکروسکوپی (منطقه بدون تماس پوشش با زمینه). بزرگنمایی: ۲۰۰۰ برابر



شکل ۱۵ نوع جدایش در نواحی مختلف منحنی تغییرات قدرت چسبندگی با افزایش رزین در فرمول لایه پوششی.

(۱) - جدایش در توده پوشش: عدم وجود رزین کافی برای نخیس کردن دانه‌های پرکننده

(۲) - جدایش بین پوشش و زمینه: با سطح زمینه کاملاً نخیس نشده یا انرژی کششی کافی وجود ندارد.

(۳) جدایش در فصل مشترک پوشش و زمینه: سطح در حال نخیس شدن کامل و افزایش پیوندهای اتصال چسبندگی قوی.

(۴) جدایش در توده پوشش یا در فصل مشترک: به خواص مکانیکی بستگی پوشش دارد.

\* ممکن است در ضریب استحکام لایه پوششی در اثر افزایش رزین پایه کاهش بوجود آید و منحنی به طرف پایین گرایش پیدا کند و جدایش در توده لایه پوششی رخ دهد.

موثر بودن این روش در ارزیابی میزان چسبندگی در کیفیت‌های پائین‌تر پوشش‌ها را نشان می‌دهد.

۲- نتایج امیدوارکننده آزمایش بالا انگیزه اصلی محقق برای پیشنهاد نمودن انجام آزمایش جدید، یا اعمال تغییرات در آزمایش جاری می‌باشد؛ هر چند در باره دلایل علمی و یا مشاهدات تجربی تأثیر عواملی چون: سطح جدایش، ضخامت لایه پوششی، اندازه زاویه برش، جهت و زاویه برداشت نوارچسب و غیره، بررسی‌های بیشتری باید صورت پذیرد. بنابراین، اظهار نظر در مورد امکان تبدیل نمودن حالت کیفی آزمایش به کمی در این مرحله زود می‌باشد.

۳- در آزمایش جدایش کششی (طراحی شده جدید)، از آنجا که در نمونه‌های آزمایشی، چسبندگی در فصل مشترک لایه پوششی و زمینه یکنواخت نبود و جدایش پوشش به طور کامل انجام نگرفت، اندازه‌گیری مستقیم قدرت چسبندگی امکان نداشت. در عین حال، هماهنگی موجود در نتایج نیروی جدایش و مساحت سطح جدا نشده پوشش، استفاده از آزمایش فوق به عنوان یک روش آزمایشی کمی را امکان پذیر می‌نماید.

۴- روش پیشنهادی جدید "جدایش برشی"، را می‌توان به عنوان یک روش کمی برای ارزشیابی قدرت - چسبندگی مورد استفاده قرارداد. در این روش، اگر چه میزان قدرت چسبندگی را مستقیماً ارائه نمی‌دهد، ولی با آن رابطه مستقیم دارد.

آزمایش فوق می‌تواند برای اندازه‌گیری و مقایسه قدرت چسبندگی انواع پوشش‌ها بر روی زمینه‌های مختلف، (به ویژه آن دسته که چسبندگی غیر یکنواخت در سطح میکروسکوپی دارند)، مفید واقع شود. در نهایت در این آزمایش روشی سریع و نسبتاً دقیقی را معرفی می‌نماید.

در آزمایش جدید جدایش سایشی، وجود اینگونه نواقص (پل در لایه پوششی)، در نتایج بدست آمده تأثیر چندانی نمی‌گذارد. زیرا ماهیت جدایش در این آزمایش برشی می‌باشد، و پل‌های میکروسکوپی در لایه پوششی نمی‌توانند به عنوان اهرم ایجاد ضعف عمل نمایند. بنابراین، در آزمایش یاد شده اگر چه نمی‌توان مستقیماً میزان قدرت چسبندگی را اندازه‌گیری کرد، ولی شاید بتوان آن را به عنوان یک روش جدید معتبر کمی، مقایسه‌ای و مرتبط با قدرت چسبندگی معرفی کرد و به کار گرفت.

منحنی تغییرات قدرت چسبندگی (به صورت توجیهی) با افزایش رزین پایه در شکل (۱۵)، نشان داده شده است و تشابه ناحیه ۲ این منحنی با منحنی‌های شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) که از نتایج آزمایش‌های جدایش کششی و جدایش سایشی بدست آمده، دلایل وجود تغییرات ناگهانی را در محدوده ۶۵ درصد نسبت افزایش رزین پایه به فرمول اولیه را ممکن است توجیه و تفسیر نماید. یعنی در این ناحیه با بالا رفتن میزان خیس‌کنندگی (یا مقدار انرژی کششی) سطح زمینه توسط رزین پایه، تعداد پیوندهای اتصال (یا قدرت چسبندگی) در فصل مشترک، در حال افزایش می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

۱- در روش پیشنهادی جدید، "برش‌های متقاطع و نوارچسب"، نتایج آزمایش‌های متعدد بر روی نمونه‌های گوناگون بیانگر عدم کارایی این روش برای پوشش‌های با قدرت چسبندگی قوی و یا ضعیف می‌باشد. در عین حال وجود سطح جدایش بیشتر پوشش در نوک زوایای تندتر،

## مراجع

1. Swaraj Paul, J. "Physical – Chemical Intentional of Paint film Adhesion ", *J. of Polymer Coating*, Vol. 54, No.642., (1982).
2. John Shield, "*Adhesion Handbook*", 3rd ed. Butterworth & Co. Ltd. (1984).
3. S. J. Bull, and D. S. Rickerby, "*Handbook of Surface Engineering*", London, Blakie, (1990).
4. ASTM 27 (Tape-Test D3359-78).
5. D. Jink, H. Brown, and D. Buxton, "A Variable Radius Roll Adhesion Test (VaRRAT) Suitable for Measuring The Adhesion of Paint toMetal," *J. Coating Technology*, Vol. 74, No. 926, p. 49-61,(2002)
6. ASTM (Tensile D424-43).
7. ASTM (Shear D1002–72).
8. K. Holmberg, and A. Mathews, "*Coating Tribology Series 28*", ed. by D. Dowson. Elsevier, p.274-283.
9. ASTM (Scrape D2197-98), (1998).
10. P. C. Jindol, D. T. Quinto, and G. J. Wolfe, "*Thin Solid Films*", p. 151, (1987)
11. F. Garbassi, M. Morra, and E. Occhiello, "Polymer Surfaces", *J. Wiley, England*, (2000).
12. S. B. Hoff, "*Screen Printing*", Delmar Publishers (ITP)", (1997).
13. J. Seguroda, "*A Comparative Kinetic Study of Commercial Photoinitiators for UV/Visible Curable System. In Radcure Coating and Inks (Curing Performance)*", ed. by Oil & Colour Chemist Association. (1998).
14. J. V. Koleske, "Radiation Curing of Coatings", ASTM (International), (2002).
15. A. J. Bean., R. Bassemir, "UV Curing of Printing Inks, UV Curing", Science and Technology, (1979).
16. S. Kessel, "*UV Curable Screen Inks, in Chemistry & Technology of UV/EB Formulation for Coating, Ink & Paint*", ed. by P. K. T. Oldring, J. Wiley, (1997).
17. V. Jardret, B. N. Lucas, and W. Oliver, "ScratchDurability of Automotive Clear Coatings: A Quantative, Reliable and Robust Methodology", *J. Coating Technology*, Vol, 2, No. 907, p.79-88, (2000).
18. A.W. Adamson, and A.P. Gast, "*Physical Chemistry of Surfaces*," 6<sup>th</sup> Edn., J. Wiley, (1997).